

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ В ВАЛКАХ

УДК 621.771

ГРИДИН А.Ю., канд. техн. наук, доц. НМетАУ, г. Днепропетровск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЗОНЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ

Предложен новый экспериментальный метод определения длины зоны деформации при валковой разливке-прокатке, заключающийся в установлении границы между участками кристаллизации и прокатки путем анализа микроструктуры материала, оставшегося между валками после их контролируемой остановки во время разливки.

Валковая разливка-прокатка, экспериментальная установка, зона деформации, зона кристаллизации, микроструктура

Запропоновано новий експериментальний метод визначення довжини зони деформації при валковій розливці-прокатці, який полягає у знаходженні межі між ділянками кристалізації та прокатки шляхом аналізу микроструктури матеріалу, що залишився між валками після їх контрольованої зупинки під час розливки.

Валкова розливка-прокатка, експериментальна установка, зона деформації, зона кристалізації, микроструктура

A new experimental method of the deformation zone length definition at the twin-roll casting is suggested. It consists in the detection of an interface between area of crystallization and area of rolling by means of microstructure analysis of the material, which is left between the rolls after their controlled stop during a casting.

Twin-roll casting, experimental equipment, zone of deformation, zone of crystallization, microstructure

Несмотря на 150-ти летний возраст идеи сэра Генри Бессемера о получении листа путем формирования его непосредственно из расплава между двумя вращающимися валками, промышленное применение этого способа кристаллизации при изготовлении плоского проката достаточно ограничено. Это связано с более высокими текущими производственными расходами при переходе с классической на новую технологию, во многом из-за ее инновационной составляющей, а также большей себестоимостью тонны продукции по сравнению с линиями оборудованными машинами непрерывного литья тонких, толщиной от 50 до 90 мм, слябов при выполнении крупных заказов по одному марочному сортаменту [1]. Последнее объясняется меньшей производительностью литейно-прокатных агрегатов (ЛПА) с машинами непрерывной валковой разливки-прокатки, что делает их конкурентноспособными при мелкосерийном изготовлении листов из нерядовых марок сталей и сплавов в объеме 300-700 тыс. т. в год [2].

Тем не менее, благодаря возможности снижения энергопотребления на 90% по сравнению с традиционной схемой, включающей в себя непрерывную разливку слябов, а также уменьшению выбросов в атмосферу углекислого газа в семь раз и в десять раз меньшим капитальным затратам на строительство и

установку ЛПА с двухвалковыми кристаллизаторами, данная технология считается одним из перспективнейших направлений развития листопрокатного производства. Более подробно достоинства и недостатки процесса непрерывной валковой разливки-прокатки описаны в работах [3, 4].

Особенностью работы двухвалковых кристаллизаторов является совмещение процессов затвердевания материала и его последующей пластической деформации в пространстве между двумя вращающимися навстречу друг другу составными водоохлаждаемыми валками. Таким образом непосредственно из расплавленного металла возможно получение литых полос толщиной от 0,5 до 20 мм в лабораторных [5, 6] и от 1,5 до 9,5 мм в промышленных условиях [1,7]. Поперечное сечение зоны кристаллизации-деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке схематично представлено на рисунке 1.

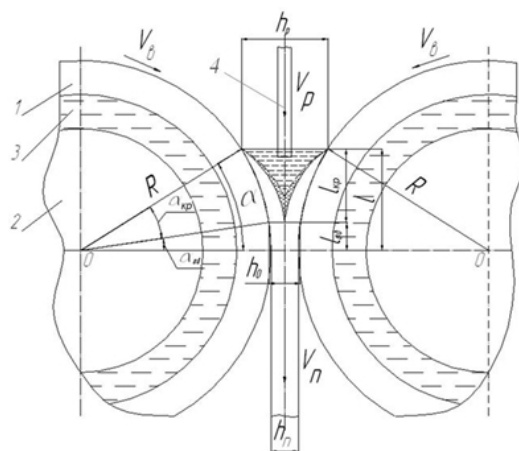


Рис. 1 – Схема зоны кристаллизации-деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке: 1 – бандаж составного валка; 2 – ось валка; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – питатель (дюза) для подачи жидкого материала в межвалковое пространство; R – внешний радиус бандаж; l – общая длина зоны кристаллизации-деформации; α – угол контакта металла с валком; $l_{кр}$ – длина зоны кристаллизации; $\alpha_{кр}$ – угол, характеризующий протяженность области кристаллизации; $l_{об}$ – длина зоны деформации; $\alpha_{об}$ – угол, характеризующий протяженность участка прокатки; h_p – поперечный размер ванны жидкого металла; h_0 – толщина полосы в начале зоны деформации; $h_{л}$ – толщина полосы на выходе из валков; V_b – окружная скорость валков (скорость разливки); V_p – скорость подачи жидкого металла; $V_{л}$ – скорость выхода полосы из валков.

Как видно из рисунка 1, металл, находящийся в межвалковом пространстве, при непрерывной валковой разливке-прокатке последовательно перемещается через области кристаллизации и деформации. Между тем саму зону кристаллизации можно разделить на три характерных подобласти [4, 8]. При входе валков в ванну жидкого металла в течении промежутка времени около 20 мс охлажденный инструмент контактирует с расплавом, перегретым выше температуры ликвидус, поэтому на начальном участке зоны кристаллизации формирование на поверхности бандаж слоя затвердевшего металла не происходит. Эта подобласть характеризуется незначительной протяженностью и максимальными по длине зоны кристаллизации-деформации значениями

скорости охлаждения, достигающими 10^6 К/с [9, 10]. После образования на поверхности валка сплошной корки затвердевшего материала, формирующейся по данным работы [11] по истечении 40...80 мс, начинается участок, на котором со стороны обеих бандажей происходит ее рост. Для этой подобласти характерно уменьшение значения величины теплового потока на границе металл-инструмент до достижения его минимума [12]. На этой стадии процесса рост толщины корки с достаточной степенью достоверности можно описать функцией квадратного корня [2, 12], впервые предложенной в 1974 году в работе М.К. Флемингса [13]. Третья подобласть зоны кристаллизации выделена на рисунке 1 сетчатой штриховкой и отображает материал, находящийся в полужидком состоянии. Температура металла на этом участке лежит между температурами ликвидус и солидус, представленными на схеме зоны кристаллизации-деформации в виде изолиний, ограничивающих данную подобласть сверху и снизу соответственно. С точки зрения уменьшения сегрегации в центральной части полосы, протяженность этой зоны должна быть минимизирована, что осуществляется за счет подбора оптимальных параметров процесса непрерывной валковой разливки-прокатки. Из-за контакта между дендритами корки со стороны левого и правого валка растет давление на контакте с инструментом, что приводит к интенсификации теплоотбора от обрабатываемого материала к бандажам. При обработке чистых металлов, а также сплавов эвтектического химического состава данная подобласть не наблюдается. В зоне деформации жидкая фаза полностью отсутствует. Здесь по аналогии с процессом горячей прокатки листов осуществляется пластическое формоизменение металла между вращающимися валками, обладающим, однако, своими характерными особенностями:

- на контактной поверхности металла с валком наблюдается полное прилипание [14];
- как видно из рисунка 1, стационарный процесс валковой разливки-прокатки протекает при отсутствии задней внешней зоны, что накладывает свой отпечаток на характер пластического течения;
- из-за относительно высокого градиента температур по толщине листа – приконтактные слои металла холоднее, чем внутренние – деформация локализуется в центральной области полосы.

Последние две особенности выделены автором на основании анализа результатов математического моделирования непрерывной валковой разливки-прокатки [15], а также анализа микроструктуры плоских литых изделий, о чем пойдет речь далее.

Следует отметить, что, в зависимости от выбранного сочетания параметров процесса, длина зоны деформации может изменяться от нуля до величины, ограниченной точностью получаемых листов, которая в свою очередь находится в прямой зависимости от нагрузки на относительно податливую по сравнению с традиционной прокатной клетью конструкцию, или, в крайнем случае, мощностью привода. Осуществление валковой разливки-прокатки с большим относительным обжатием с одной стороны снижает производительность установки, с другой – пластическое формоизменение улучшает микроструктуру металла за счет заваривания пор в материале [11], дробления литой структуры и

образования новых рекристаллизованных зерен. В работе [16] указано, что степень деформации, обеспечивающая хорошее качество металла при обработке стали, должна составлять не менее 15%. Для алюминия и его сплавов согласно данным [13] затвердевшую полосу в валковом кристаллизаторе необходимо обжать как минимум на 20...30%. При известной длине зоны прокатки и кристаллизации степень деформации можно рассчитать по приближенной формуле, предложенной Х. Вестенгеном и К. Несом [17]:

$$\varepsilon \approx \frac{l_{\text{ог}}^2}{l_{\text{ог}}^2 + h_p \cdot D} \times 100\% = \frac{(l - l_{\text{кр}})^2}{(l - l_{\text{кр}})^2 + h_p \cdot D} \times 100\%, \quad (1)$$

где D – внешний диаметр бандажа.

К основным оперативно варьируемым параметрам валковой разливки-прокатки, определяющим устойчивое протекание непрерывного процесса, получение полосы без поверхностных дефектов и достижение требуемого высокого уровня механических свойств относятся: температура расплава, подаваемого через дюзу; скорость вращения бандажей $V_{\text{в}}$, синхронизированная со скоростью подачи жидкого металла в межвалковое пространство $V_{\text{л}}$; высота зоны кристаллизации-деформации l ; расстояние между валками h_0 ; наличие смазки на их поверхности; расход охлаждающей жидкости. Кроме того, необходимо принимать во внимание заложенные на этапе проектирования индивидуальные характеристики отдельно взятых установок и конструкцию рабочего инструмента, включающих в себя: диаметр бандажей D ; толщину стенки бандажей и их материал; рельеф поверхности валков; форму и размеры питателя и т.п.

Из приведенных выше данных видно, что информация о длине участка деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке может рассматриваться как интегральный показатель, определяющий близость выбранного режима работы агрегата к оптимальному. Понимание важности данного фактора проходит красной нитью через многие работы, посвященные изучению процесса формирования листа в двухвалковом кристаллизаторе, однако сложность непосредственного экспериментального установления границы между двумя характерными областями зоны кристаллизации-деформации заставляет большинство авторов обращаться к математическому моделированию [16, 18, 19, 20 и др.]. Вместе с тем, верификация результатов, полученных при помощи расчетных методов, при отсутствии опытных данных является крайне затруднительной.

Из литературы автору известна лишь одна публикация, посвященная экспериментальному определению протяженности зоны кристаллизации при непрерывной валковой разливке-прокатке [21]. В этой работе С. Берковичи, сотрудник центра исследований и развития французской фирмы Pechiney, с 1956 года специализирующейся на проектировании и изготовлении ЛПА для производства листов из алюминиевых и магниевых сплавов с машинами непрерывной валковой разливки-прокатки, отрабатывая на примере технически чистого алюминия марки AA1050 технологию эксплуатации новой установки с двухвалковым кристаллизатором Jumbo 3C, провел ряд опытов с погружением в ходе разливки в зону кристаллизации удерживаемых термпар и тонких

цилиндрических штифтов. Путем постепенного контролируемого ввода образцов в глубину зоны кристаллизации фиксировалось перемещение внедряемого тела от входа в ванну жидкого металла до момента смыкания вокруг него фронтов кристаллизации и втягивания его в зону прокатки. Признаком последнего служило скачкообразное изменение скорости движения штифта. Таким образом С. Берковичи для технически чистого алюминия было проанализировано влияние на протяженность зоны кристаллизации таких параметров процесса, как скорость разливки (в диапазоне 0,55...1,9 м/мин), длина зоны кристаллизации-деформации (варьировалась от 28,5 до 133 мм), толщина готовой полосы (устанавливалась равной 6 мм и 10 мм) и диаметр валков (620 мм и 960 мм). По результатам проведенных экспериментов показано, что продольный размер области кристаллизации не превышает 20% общей длины l и в зависимости от выбранного режима составляет от 4 до 25 мм. На основании полученных данных были сделаны выводы об оптимальных условиях валковой разливки-прокатки, обеспечивающих изготовление бездефектного листа.

Недостатком описанного метода экспериментального определения длины участка кристаллизации является необходимость наличия специфической измерительной аппаратуры, а также затруднение в доступе к зоне кристаллизации-деформации в ходе разливки со стороны дюзы, в особенности при реализации процесса по схеме с горизонтальным подводом расплава. Преимуществом описанного подхода служит практически мгновенное получение искомых опытных значений. К сожалению, недостатки указанного метода ограничили его применение при экспериментальном анализе непрерывной валковой разливки-прокатки фактически только рассмотренной выше исследовательской работой.

Исходя из этого, актуальность разработки нового подхода определения геометрических показателей зоны кристаллизации-деформации очевидна. Целью данной работы служит создание и апробация нового экспериментального метода установления протяженности зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке.

Для проведения исследований, в рамках совместной научной работы между кафедрой обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины и Институтом материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница (ФРГ), была создана экспериментальная машина валковой разливки-прокатки тонких полос. Разработанная установка имеет составные водоохлаждаемые валки со стальными бандажами диаметром 370 мм. Длина рабочего участка валков – 200 мм. Толщина стенки бандажей составляет 15 мм. Более подробное описание созданной машины и ее технических характеристик приведено в работе [22].

По аналогии с исследованиями С. Берковичи, ввод в эксплуатацию новой экспериментальной установки осуществлен для технически чистого алюминия с содержанием последнего 99,7%. Химический состав выбранного сплава отвечает спецификации EN AW-1070. Первая попытка определить протяженность зоны кристаллизации и/или зоны деформации в ходе непрерывной валковой разливки-прокатки была осуществлена путем погружения термоэлемента в ванну

расплавленного металла при неконтролируемом его перемещении до момента смыкания вокруг него корок затвердевшего материала. Условия проведения эксперимента представлены в таблице 1.

Табл. 1 – Основные технологические параметры валковой разливки-прокатки алюминия марки EN AW-1070. Эксперимент №1.

Технологический параметр	Значение
Температура разливки, °С	690
Скорость разливки, м/мин	3,3
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	60
Толщина готовой полосы, мм	3,0
Смазка поверхности валков	графит
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	112
Температура охлаждающей жидкости, °С	16
Положение литейной дюзы	симметрично относительно оси разливки-прокатки

Термоэлемент вводился в зону кристаллизации-деформации после выхода температурного поля бандажей на стационарный тепловой режим, что соответствует примерно пятому обороту вращения валка после начала разливки [4]. Место погружения температурного датчика находилось в средней части ванны по ее ширине. Диаметр термоэлемента составлял 0,5 мм, длина – 1500 мм. Температурный датчик был подключен к компьютеру, записывающему считываемые данные в текстовый файл с частотой 10 Гц. После втягивания термоэлемента между валками почти на полную длину было произведено его обрезание.

Данные об изменении температуры в ходе валковой разливки-прокатки алюминия при указанном выше сочетании технологических параметров процесса приведены в виде графика на рисунке 2.

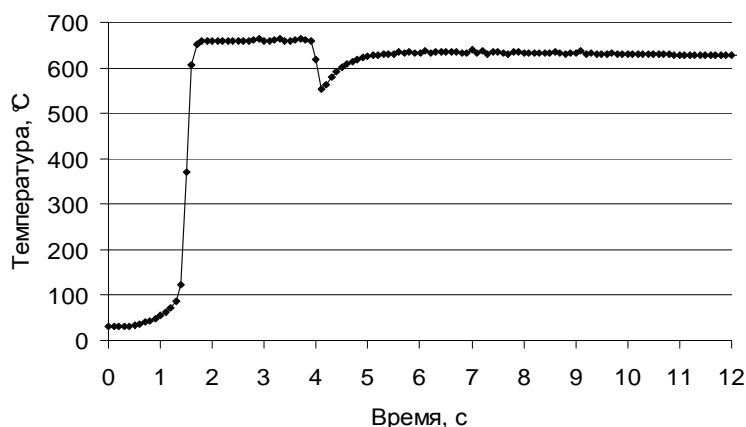


Рис. 2 – Изменение температуры при неконтролируемом погружении термоэлемента в зону кристаллизации, прохождении его через участок деформации и после его выхода вместе с полосой из валков

Анализ полученных данных показывает, что без специальной аппаратуры, обеспечивающей контролируемое перемещение термоэлемента в области кристаллизации, не представляется возможным определить путь или хотя бы

точный отрезок времени, характеризующих равномерное прохождение датчика через участок жидкой фазы. Вместе с тем, положение начала области деформации на кривой хорошо различимо и соответствует моменту резкого падения температуры материала. Однако затем, за счет выделения тепла от работы деформации, температура металла вновь начинает увеличиваться. Из-за инерционности эффекта выравнивания температуры по сечению полосы – тепло перераспределяется от горячей середины к относительно холодной поверхности – определение точного времени выхода листа из валков, соответствующего концу зоны деформации, также практически неосуществимо.

Для дальнейших исследований по определению параметров зоны кристаллизации-деформации был использован оригинальный метод, связанный с контролируемой остановкой валков в процессе разливки-прокатки. Следует отметить, что прерывание операции разливки на установках данного типа принято считать нежелательной, практически аварийной ситуацией, способной привести к поломке технологического оборудования. Поэтому даже в лабораторных условиях торможение валков при одновременной подаче в них расплавленного металла не производится. Чтобы обеспечить возможность осуществления остановки валков в ходе разливки, в одном из боковых ограничителей, которые прижимаются к торцевым участками бандажей и наряду с ними формируют зону кристаллизации-деформации, было проделано переливное отверстие, в которое затем была выведена отводная труба. По этому металлопроводу излишки материала, подаваемого из дюзы в межвалковое пространство, поступают в изложницу, где происходит их затвердевание. После охлаждения остатки материала могут быть вновь использованы для проведения последующих экспериментов. В настоящее время на лабораторной установке валковой разливки-прокатки установлены боковые ограничители и отводная труба из стали. Для предотвращения закупоривания металлопровода по причине кристаллизации в нем материала осуществляется его подогрев при помощи набора спиральных электрических нагревателей суммарной мощностью 1,8 кВт, а также его внешняя изоляция. Температура нагревателей в 750 °С обеспечивает беспрепятственное прохождение излишков расплава в изложницу. Дополнительное уменьшение теплоотдачи от металла вспомогательному инструменту достигается за счет покрытия внутренней поверхности отводной трубы, изложницы и стенок боковых ограничителей тонким слоем нитрида бора, предотвращающего также образование в алюминии интерметаллических фаз Al_xFe_y , которые ухудшают свойства материала и затрудняют его повторное использование. Упростить конструкцию отводной системы за счет отказа от ее нагрева, изолирования и применения покрытий можно при переходе на керамические боковые ограничители и металлопровод. При этом, однако, следует помнить о большей уязвимости керамики при приложении к ней механической нагрузки. С точки зрения безопасности проведения экспериментов с расплавленным материалом использование стальных конструкций представляется автору более предпочтительным. Фотография бокового ограничителя с отверстием представлена на рисунке 3.

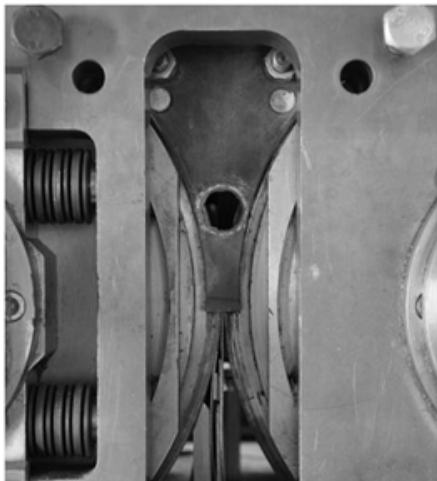


Рис. 3 – Боковой ограничитель с отверстием

Аналогично описанному ранее эксперименту с термоэлементом, манипуляции, связанные с определением протяженности зоны деформации проводятся после достижения стационарного теплового режима инструмента. В данном случае осуществлялась остановка вала при одновременном прекращении подачи расплава из ковша. Остатки жидкого металла из литейной коробки и питателей в течение десятка секунд продолжали поступать в межвалковое пространство, откуда отводились через отверстие в

боковом ограничителе. Некоторое количество переохлажденного материала при этом застывает над первоначальной зоной кристаллизации. Типичный пример внешнего вида алюминия, закристаллизовавшегося между бандажами во время разливки-прокатки и после остановки валков представлен на рисунке 4.

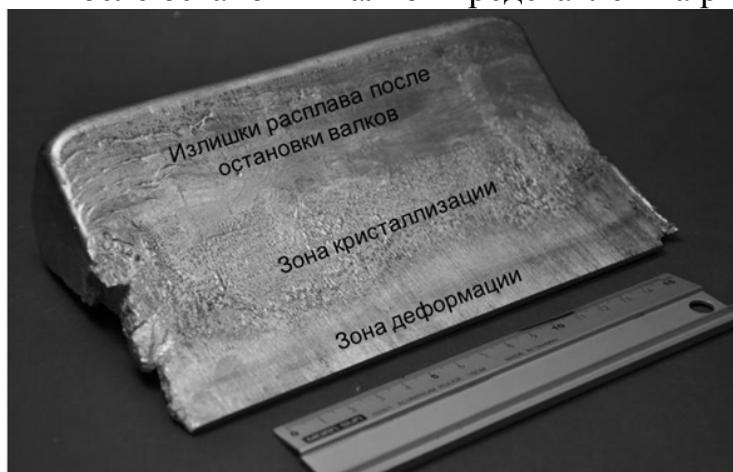


Рис. 4 – Материал, извлеченный из межвалкового пространства после остановки бандажей в ходе одной из разливок

Исходя из качества контактной поверхности материала с валком на разных участках „слепок“ зоны кристаллизации-деформации, можно сделать первые выводы о распространении той или иной области при затвердевании металла и прокатке во время его прохождения через подвижный кристаллизатор. Зона деформации характеризуется четкими отпечатками рельефа бандажей. Участок кристаллизации имеет матовый оттенок и содержит множество стохастически распределенных впадин и бугорков, вытянутых в направлении разливки и в несколько раз превышающих по своей ширине поперечный размер канавок, выполненных на поверхности валков для облегчения образования зародышей твердой фазы. Область затвердевания излишков расплава, не характерная для непрерывного процесса валковой разливки-прокатки и образующаяся уже после остановки привода, имеет гладкую глянцевую поверхность, пересекаемую в поперечном направлении немногочисленными складками.

Из рисунка 4 видно, что границы между зонами изменяют свое положение вдоль бочки банджа незначительно и в первом приближении могут быть представлены прямой линией, параллельной плоскости сечения выхода полосы из валков. Это свидетельствует о равномерном течении материала как в области жидкой, так и твердой фазы, и должно позитивно отражаться на свойствах готового листа. Таким образом, уже на этапе извлечения затвердевшего материала из межвалкового пространства представляется возможным путем прямых измерений приближенно определить протяженность участков кристаллизации и деформации. Однако размытость перехода между областями допускает погрешность в определении их длины в пределах ± 2 мм, что в наихудшем случае может составить 10% от совокупного размера комиль-зоны.

Более точное установление местоположения начала участка пластического формоизменения возможно при проведении металлографического анализа материала на поперечном сечении „слепка“ зоны кристаллизации-деформации. Для проведения такого исследования при параметрах процесса, соответствующих данным таблицы 2, была проведена валковая разливка-прокатка технически чистого алюминия EN AW-1070 с контролируемой остановкой привода. Из средней по ширине части материала, извлеченного из межвалкового пространства, был вырезан образец, который был затем отшлифован, отполирован и протравлен на макроструктуру по методике Кролля (см. рис. 5). Данный шлиф демонстрирует различие между размерами и формой зерен в центральной и приконтактной областях, а также демонстрирует изменение ориентировки структуры при переходе от кристаллизации к деформации и ее последующем развитии.

Табл. 2 – Основные технологические параметры валковой разливки-прокатки алюминия марки EN AW-1070. Эксперимент №2.

Технологический параметр	Значение
Температура разливки, °C	680
Скорость разливки, м/мин	2,7
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	60
Толщина готовой полосы, мм	4,25
Смазка поверхности валков	отсутствует
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	112
Температура охлаждающей жидкости, °C	16
Положение литейной дюзы	смещена в сторону левого вала

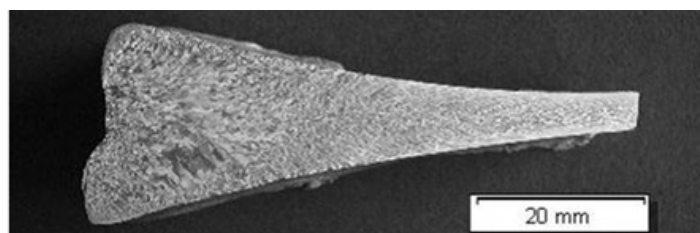


Рис. 5 – Макроструктура поперечного сечения зоны кристаллизации-деформации образца из технически чистого алюминия, полученного методом контролируемой остановки валков

Затем образец, изображенный на рис. 5, был протравлен на микроструктуру по методике Баркера. Три фотографии зеренной структуры, выполненные в центральной части „слепок“ в характерных областях зоны кристаллизации-деформации, представлены на рисунке 6.

Зеренная структура материала, находящегося в центральной части зоны кристаллизации, имеет после затвердевания глобулярный характер. Здесь следует отметить, что в ходе непрерывной валковой разливки-прокатки металл в этой области находится в жидком состоянии, а глобулярная литая микроструктура при оптимальных условиях ведения процесса не образуется. Шлиф, представленный на рисунке 6а, относится к моменту сквозного затвердевания материала по толщине и началу его пластического обжатия. Распознать признаки локального формоизменения металла можно по появлению первых рекристаллизованных зерен (см. правую часть снимка), а также нарушению ячеистой структуры внутри литых зерен. На выходе из зоны кристаллизации-деформации материал имеет структуру, типичную для плоского проката. Наблюдается развитая текстура, зерна сильно вытянуты в направлении прокатки. Следует отметить, что микроструктура алюминиевой полосы, полученной при идентичных условиях, но охлаждаемой после выхода из валков-кристаллизаторов на воздухе, имеет меньшую структурную анизотропию за счет прохождения в материале процессов рекристаллизации при медленном его охлаждении.

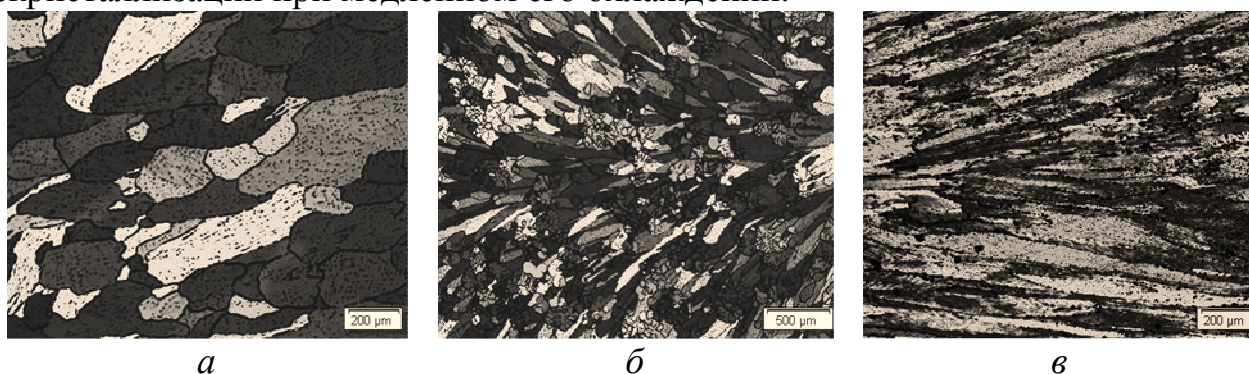


Рис. 6 – Микроструктура алюминиевого образца, полученного методом контролируемой остановки бандажей при валковой разливке-прокатке: *а* – в центральной части зоны кристаллизации; *б* – на участке перехода к пластическому формоизменению, *в* – в конце зоны деформации.

Из вышесказанного следует, что определение положения границы между зонами кристаллизации и деформации металлографическим методом по образцу, отобранному из материала, оставшегося в межвалковом пространстве после контролируемой остановки валков, представляется возможным с оцениваемой точностью установления длины зоны деформации в пределах $\pm 0,5$ мм, что в четыре раза выше, чем при выполнение непосредственных измерений по отпечаткам бандажей на поверхности „слепок“ зоны кристаллизации-деформации. В данном случае, при проведении валковой разливки-прокатки технически чистого алюминия в условиях, соответствующих данным таблицы 2, длина зоны деформации составила 34,2 мм. Степень деформации металла лежит около 63%. По полученным данным можно сделать вывод о возможности увеличения скорости разливки без ущерба качеству обрабатываемого материала.

Таким образом, разработан и успешно апробирован новый экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке. Дальнейшие исследования, связанные с освоением технологии производства тонких полос на машине с двухвалковым кристаллизатором, в частности для высокопрочных алюминиевых сплавов EN AW-6082 и EN AW-7020, будут проводиться с использованием данного подхода.

Список литературы: 1. Zapuskalov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology // *ISIJ International*. – 2003. – №8. – P. 1115-1127. 2. Рудой Л.С. Двухвалковая установка непрерывной разливки стали (ДВ УНПС) // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №7. – С.244-246. 3. Данченко В.Н. Непрерывная валковая разливка-прокатка стальных полос // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Дніпропетровськ: "Системні технології"*. – 2002. – Т.5. – С. 63-72. 4. Гридин А.Ю. Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки // *Обработка материалов давлением*. – 2009. – №1 (20). – С. 75-83. 5. Defect formation in twin roll-cast AA 3xxx and 5xxx series aluminium alloys / Ch. Gras, M. Meredith, K. Gatenby, J.D. Hunt // *Materials Science Forum*. – 2002. – №396-402. – P. 89-94. 6. Vanik H.-G. Thermomechanische Behandlung von endabmessungsnah gegossenen und direkt gewalzten Stahlbaendern bei Giessdicken von 5-20 mm. *Umformtechnische Schriften*. Band 105. – Aachen: Shaker Verlag, 2002. – 72 s. 7. Slamova M., Voda O. New horizons for twin-roll casting // *Aluminium International Today*. – 2001. – June(6). – P. 85-88. 8. Kloss W. Duennbandgiessen mit variablem Giessspalt. *Umformtechnische Schriften*. Band 144. – Aachen: Shaker Verlag, 2005. – 180 s. 9. Strezov L., Herbertson J., Belton G.R. Mechanisms of initial melt/substrate heat transfer pertinent to strip casting // *Metallurgical and Materials Transactions. B. Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2000. – Vol.31. – P. 1023-1030. 10. Evans T., Strezov L. Interfacial heat transfer and nucleation of steel on metallic substrates // *Metallurgical and Materials Transactions. B. Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2000. – Vol.31. – P. 1081-1089. 11. Николаев В.А. Некоторые особенности процесса бесслитковой прокатки стальных полос // *Производство проката*. – 2007. – №5. – С. 11-13. 12. Guthrie R.I.L., Tavares R.P. Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin-roll/horizontal belt thin strip casting machines // *Proc. of international Conference on CFD in Minerals & Metals Processing and Power Generation CSIRO*. – 1997. – P. 41-54. 13. Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006. – 292 p. 14. Jestrabek J. Stahlbandherstellung nach dem Zweirollenverfahren – Modellierung des Strömungs- und Temperaturfeldes. *Umformtechnische Schriften*. Band 59. – Aachen: Shaker Verlag, 1995. – 148 s. 15. Grydin O., Batyrshina E., Bach Fr.-W. Mathematische Modellierung des Gießens von dünnen Blechen nach dem Zwei-Rollen-Verfahren // *Proc. of ANSYS Conference, 27th CADFEM Users' Meeting, Leipzig*. – 2009. – 2.11.15. – S. 1-9. 16. Бровман М.Я., Николаев В.А., Полухин В.П. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке // *Металлы*. – 2007. – №1. – С. 44-49. 17. Westengen H., Nes K. Twin roll casting of aluminum: the occurrence of structure inhomogeneities and defects in as-cast strip // *Proc. of conference "Light Metals"*, TMS, Los Angeles. – 1984. – P. 1111-1127. 18. Santos C.A., Spim J.A., Garcia A. Modelling of solidification in twin-roll strip casting // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – №102(1-3). – P. 33-39. 19. Chang J.G., Weng C.-I. Numerical modelling of twin-roll casting by the coupled fluid flow and heat transfer model // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 1997. – Vol.40. – P. 493-509. 20. Гридин А.Ю. Влияние температурно-скоростных параметров процесса непрерывной валковой разливки на тепловое состояние металла // *Теория и практика металлургии*. – 2009. – №3. – С. 71-75. 21. Bercovici S.J. Optimisation of 3C roll caster by automatic control // *Proc. of conference "Light Metals"*, TMS, New York. – 1985. – P. 1285-1299. 22. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / А.Ю. Гридин, И.К. Огинский, В.Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 5.